

# 深圳软硬不均地层盾构机选型分析

余国生<sup>1</sup>, 段景川<sup>1</sup>, 马国富<sup>2</sup>, 张家铭<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中电建南方建设投资有限公司, 广东 深圳

<sup>2</sup>中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

Email: 263375999@qq.com

收稿日期: 2020年11月24日; 录用日期: 2020年12月17日; 发布日期: 2020年12月28日

## 摘要

深圳地铁12号线同乐 - 流塘区间的地铁隧道工程采用盾构法施工, 区间穿越砾质黏性土、全 - 微风化粗粒花岗岩等复杂地层, 施工风险极高。为了实现掘进时的安全高效, 针对工区地质条件进行盾构的选型与部分机械参数的计算, 期望得到与实际地质条件相匹配的盾构设计, 在一定程度上降低施工的风险。最终盾构机选用了泥土加压的土压平衡式盾构, 其余各性能参数均与理论计算相符, 实际工程施工表明该盾构能够满足此类复合地层掘进的需要, 得到了盾构选型的原则与经验, 为此类工况盾构选型提供参考。

## 关键词

地铁, 复合地层, 盾构选型, 施工安全

# Selection Analysis of Shield Tunneling in Shenzhen with Uneven Soft and Hard Strata

Guosheng She<sup>1</sup>, Jingchuan Duan<sup>1</sup>, Guofu Ma<sup>2</sup>, Jiaming Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Electric Power Construction South Construction Investment Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

<sup>2</sup>Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Email: 263375999@qq.com

Received: Nov. 24<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 17<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 28<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

The tunnel of Tongle-Liutang section of Shenzhen Metro Line 12 is constructed by shield tunneling method, crossing complex strata such as gravelly clay soil and completely weathered to weak weathered coarse granites, so the construction risk is extremely high. In order to realize the safety and efficiency of tunneling, shield selection and calculation of some mechanical parameters are

carried out according to the geological conditions of the work area, so as to obtain the shield design matching the actual geological conditions and reduce the construction risk to a certain extent. Finally, the shield machine selected the EPB shield with soil pressure, and the other performance parameters were consistent with the theoretical calculation. The actual engineering construction showed that the shield could meet the needs of such complex formation tunneling, and the principles and experience of shield selection were obtained, providing reference for shield selection under such working conditions.

## Keywords

The Subway, Complex Strata, Shield Type Selection, Engineering Safety

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在城市地铁盾构隧道的施工中，有着较为复杂的施工条件以及严格的施工标准。城市地下空间管网结构众多，道路两边多有房屋建筑的深大基桩，同时施工中的环保、地面沉降控制等标准更为严苛，这些都对地铁隧道的设计施工造成了较大的困扰[1] [2] [3]。而在广州深圳地区，地层中还大量分布着风化程度不一的花岗岩、变粒岩等硬岩，地下水位较高，工程水文地质条件复杂多变，在这样的条件下建设地铁隧道会面临更大的挑战。

盾构机作为地铁隧道施工中最复杂的专业大型机械，其作业性能是控制隧道工程成败的关键因素，如果其作业性能与工程地质条件难以匹配，施工进度、工程安全和工程经济性难以保证，因此盾构机的选型及各项参数的确定是盾构隧道工程的重中之重[4] [5] [6] [7]。本文基于深圳地区城市地铁隧道工程，对盾构机的平衡方式和机械参数进行选取。

## 2. 工程概况

深圳市城市轨道交通 12 号线土建三工区的工程区间位于宝安中心区(见图 1)，包括同乐站 - 新安公园站区间、新安公园站 - 灵芝站区间、灵芝站 - 上川站区间和上川站 - 流塘站区间，除右线 82.1 m 明挖外大部分采用盾构法施工，共 4 站 5 区间及 2 处变电所，盾构区间总长 5596 m。



Figure 1. Plan of Shenzhen rail transit line 12

图 1. 深圳市轨道交通 12 号线平面示意图

## 2.1. 工程地质条件

隧道穿越地层主要为素填土、粗砂、粉质粘性土、砾质黏性土、全-微风化粗粒花岗岩。区间埋深 7.1~20.5 m，围岩等级为 III 级、IV 级、V 级。盾构区间硬岩段统计如表 1，盾构穿越的硬岩地层共长 2047.8 m。

**Table 1.** Statistics of hard rock section in shield section  
**表 1.** 盾构区间硬岩段统计

区间	线路	长度(m)	中风化岩(m)	微风化岩(m)	硬岩强度(MPa)	硬岩长度(m)	所占比例
同新区间	左线	833.7	256.15	181.07	>100	437.22	52.4%
	右线	824.2	257.5	181.66		439.16	53.3%
新灵区间	左线	649.1	85.28	59.54	>80	144.82	22.3%
	右线	649.1	70.62	120.46		191.08	29.4%
灵上区间	左线	912.5	4.74	229.68	>80	234.42	25.7%
	右线	912.5	84.48	98.62		183.1	20.1%
上流区间	左线	449		221	约 100	221	49.2%
	右线	448		197		197	44.0%
总计		5678.1				2047.8	36.1%

## 2.2. 水文地质条件

沿线地下水主要有两种类型：一类是第四系地层中的松散岩类孔隙潜水，主要赋存于冲洪积砂土层中，略具承压性；另一类为基岩裂隙(构造裂隙)水，主要赋存于强、中等风化带及断裂构造裂隙中，具有承压性。稳定地下水位埋深 0.10~8.20 m，标高为-7.85~16.71 m。岩层裂隙水较发育，但广泛分布在粗粒花岗岩、变粒岩及混合花岗岩的强-中等风化带、构造节理裂隙密集带及断层破碎带中。松散土层的孔隙潜水分布在第四系人工填砂层、海陆交互冲积砂层和冲洪积砂层中，为沿线主要含水层、透水层，砾砂层中渗透系数达 20~50 m/d，属于强透水层。

## 3. 盾构选型

工程区间硬岩地层、软硬不均地层均是盾构掘进的难点，同时地下水较为富集，地层透水风险高，只有合理地选择适宜的盾构结构形式、刀盘参数，盾构机才能高效安全地掘进。盾构机的选型，首先应确定其掘进面土压的平衡方式，这是保证工程安全的前提。因此对盾构机不同平衡方式的优缺点进行对比，如表 2 所示。

**Table 2.** Adaptability of shield machines with different balancing methods  
**表 2.** 不同平衡方式盾构机的适应性

项目	土压平衡式		泥水平衡式	工程情况
	削土加压式	泥土加压式		
隧道最大直径	较小，常见的直径为 6~7 m，不适宜 10 m 以上	同左	直径可达到 14 m	地铁隧道设计内径为 5500 mm
掘削面管理	调节土舱内土压力及排土量，稳定性稍差	加入土体改良剂，调节舱内土压力及排土量，稳定性一般	控制泥浆性能，调节舱内泥水压力，稳定性较好	部分软弱富水地层容易发生失稳，裂隙岩体容易大量涌水

## Continued

地表沉降控制	在软弱地层中沉降稍大	同左	沉降控制良好, 不易发生大的沉降	在软弱地层容易产生较大沉降
刀盘刀具磨损	较大, 机体直接与岩土体作用	一般, 加入的改良材料可以降低刀盘阻力和磨损	较小, 刀盘阻力小, 同时泥浆对刀盘的冷却作用	硬岩区间刀具磨损大, 尽量减少换刀的频率
地层变化的适应性	松散的砂、砂砾层较难适应	通过调节添加材料的浓度和用量, 适应不同地层	松散的砂、砂砾层较难适应	有松散的填土、砾质粘性土、全-微风化花岗岩
对环境的影响	碴土运输影响	同左	泥浆处理设备噪音及振动、碴土运输	位于城市中心区, 空气污染、噪声污染等要符合相关标准
辅助措施	为改善掘削性能需对砂层进行加固	不需要辅助措施	易坍塌的细砂及砂砾层需进行加固	根据相应选型结果确定辅助措施
掘进速度	速度快	同左	后方设备能力强则进度快, 但设备故障影响大	4年, 但可施工时间不够多, 任务重
出渣方式	螺旋输送机 + 皮带输送机 + 轨道车或皮带输送机 + 压送泵	同左	压送泵 + 泥浆, 大粒径砂砾岩渣要用出渣槽+轨道车	尽量保证连续稳定出渣
配套设备	少	少	配套设备多, 安装调试、操作复杂	尽量减少复杂设备系统的使用
机械稳定性	好	好	盾构尺寸大、设备多, 机械故障率高	尽量减少掘进过程中的机械故障停机
地层渗透系数	$<10^{-4}$ m/s	$<10^{-4}$ m/s	$>10^{-7}$ m/s	$1.16 \times 10^{-6}$ m/s~ $2.89 \times 10^{-4}$ m/s
施工占地	少, 自身尺寸不大, 且无需额外的泥浆处理占地	少, 自身尺寸不大, 且无需额外的泥浆处理占地	多, 尺寸大, 泥浆设备占地	受城市原有建设限制
造价	造价低, 根据工程需要改造也不高	同左	泥浆材料及分离处理费用较高	基于现有设备改造

由上表可知, 泥水平衡式盾构适应超大直径、高地下水压、软弱地层的掘进, 在开挖面稳定、地层沉降、刀盘磨损控制等方面均有着较大的优势, 能够广泛适应透水性好的冲洪积砂土、砂砾、黏土以及坚硬土的互层等地层; 缺点在于盾构配套设施繁多、泥浆污染环境、泥浆材料分离成本高昂、占地面积大, 难以适应高要求标准的城市地铁盾构环境。土压平衡式盾构掘进速度快, 连接设备少、拼装调试及施工操作简单, 经济环保。此外, 泥土加压式土压平衡是在削土加压的基础上加入土体改良剂改善渣土的粘塑性、拌合性以及渣土压的均一性, 对掌子面的稳定、渣土的运输和刀盘刀具的耐磨性提供更可靠的支持。因此工程选用泥土加压式土压平衡盾构。

#### 4. 盾构基本参数选择

盾构机的各项机械参数应结合地层条件、设计要求进行计算, 满足盾构机前述各系统协同作业的可靠性要求。盾构的机械参数可分为固定参数和可变参数。固定参数一经选定, 在工程施工的整个期间基本都很难进行调整, 包括盾构直径、刀盘开口率、辐条数量等; 可变参数在施工中处于频繁变化状态, 可以依据掘进需要进行相应的调整, 因此在参数计算时考虑其额定值或最大值即可, 如刀盘扭矩、盾构推力、螺旋输送机排土量等。

## 4.1. 固定参数

### 4.1.1. 开口率

在风化硬岩、砂卵石地层中掘进时，需要考虑大粒径砾石及岩碴能否顺利进入盾构土舱，这部分渣土在掘进中所占比例并不大，但会对盾构刀盘磨损、掘进效率产生重要影响，故开口率要满足土渣进仓的需求。在软弱填土、砾砂地层，掌子面的稳定性成为盾构法的控制性问题，若开口率过大，可能导致掌子面失稳，危及工程安全。其计算公式为

$$\omega_0 = \frac{A_s}{A_r} \times 100\% = \frac{9.8}{32.6} \times 100\% \approx 30\% \quad (1)$$

式中， $A_s$ 为盾构刀盘开口面积， $m^2$ ； $A_r$ 为盾构刀盘总面积， $m^2$ 。

目前辐板式盾构开口率一般为30%~50%，广州、深圳地区复合式土压平衡盾构的开口率为28%~35% [2]，因此盾构采用30%的刀盘开口率可以满足该地区隧道掘进。

### 4.1.2. 辐条数

辐条式和辐板式刀盘上需配备数根辐条用于切刀的安装以满足切削软土以及岩渣的刮渣的需要。盾构直径确定后，每根辐条上可供安装刀具的刀座数目是固定的，辐条数量关系到可以安装的刀具数、刀盘开口的布置方式，因此它对刀盘掘进的性能有着明显的影响。辐条数的计算有如下经验公式：

$$n = \frac{\pi D}{2.5 \sim 4.5} = \frac{\pi \times 6.44}{2.5 \sim 4.5} \approx 5 \sim 8 \quad (2)$$

式中， $D$ 为刀盘直径， $m$ 。

根据上述结果知盾构辐条数应为5~8条。辐条数过多可能导致刀盘整体刚度不足，难以实现本区段硬岩地层的掘进；若辐条数过少会影响刀盘开口土渣的输送通道，造成渣土黏附、排渣困难的问题。实际刀盘辐条数设置为6条可以满足施工要求。

### 4.1.3. 磨损量

在地层复杂多变、软硬岩交互的广深地区，刀具的磨损问题往往是施工的头号难题，有数据指出，刀具磨损的成本在盾构选型中可以达到4%~8%，因此刀具磨损也成为选型中需要关注的部分[8]。刀具材质、尺寸不同，正常掘进的寿命也大不相同。刀具磨损量可按下式计算：

$$\delta = \frac{K\pi DNL}{V} = \frac{0.02 \times \pi \times 6440 \times 4 \times 1}{80} \approx 20.23 \text{ mm} \quad (3)$$

式中，磨损系数 $K$ 通常根据经验取值，在砂砾地层中可取0.02 mm/km； $D$ 为刀盘直径，mm； $N$ 为刀盘转速，r/min； $L$ 为掘进距离，km； $V$ 为掘进速率，mm/min。

结果显示掘进距离为1km时刀具磨损量约为20.23 mm，本工程中各掘进区间单洞长度均小于1 km，采用的恒马滚刀允许磨损量为25 mm，刀具在一次掘进区间内的磨损不会超过磨损限值，可减少频繁停机换刀造成的工期延误以及施工风险。

## 4.2. 可变参数

### 4.2.1. 推进油缸行程

盾构机推进油缸的最大行程决定了一次支撑的最大掘进量，同时对小曲率隧道线路的最小转弯半径产生一定的影响。推进油缸行程过小，将导致停机重新支撑的次数增加，不利于盾构的连续施工，降低了施工效率；若推进时油缸行程过大，那么油缸的密封以及推力传递的效果会有所降低，且在曲线段盾

构发生卡盾的风险也大大增加，所以对推进油缸行程的选取应当谨慎。相关计算公式如下：

$$S = I_p + a + I_x = 1500 + 400 + 200 = 2100 \text{ mm} \quad (4)$$

式中， $S$  为推进油缸行程，mm； $I_p$  为管片环宽，mm； $I_x$  为封顶块搭接悬出长度，mm； $a$  为预留间隙，通常为 100~200 mm。

工程采用的管片环宽 1500 mm，盾尾预留间隙取 200 mm，封顶块搭接长 400 mm，实际盾构油缸行程为 2100 mm，与计算所得的油缸行程相同。

#### 4.2.2. 刀盘扭矩

在掘进时，刀盘扭矩与刀盘贯入度成正比关系，在施工中必须要结合扭矩控制贯入度，因此最大扭矩的确定也会对刀盘的最大贯入度产生影响。刀盘扭矩选取时应保证有一定的安全余量，因此在选取时还要引入安全率。计算公式如下：

$$T = \alpha D^3 = (10 \sim 25) \times 6.44^3 \approx 2670.90 \sim 6677.25 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (5)$$

$$S = \frac{T_0}{T} = \frac{(6846 \sim 8687)}{6677.25} \approx 1.025 \sim 1.301 \quad (6)$$

式中， $\alpha$  为扭矩系数，通常土压盾构的扭矩系数  $\alpha$  可取 10~25； $T_0$  为刀盘扭矩，kN·m； $T$  为刀盘所需扭矩，kN·m。

掘进时刀盘所需扭矩为 2670.90~6677.25 kN·m，实际刀盘额定扭矩设计为 6846 kN·m，脱困扭矩为 8687 kN·m，因此盾构在额定扭矩条件下其安全率为 1.025，脱困扭矩条件下安全率为 1.301，可以适应复杂多变的地质，在地质较硬或刀盘贯入度过大时有足够的扭矩用以脱困，在正常掘进条件下能够保证机械的经济与耐用性。

#### 4.2.3. 排土量

螺旋输送机通常与土压盾构相联系，负责将土舱内与改良剂拌合后的渣土排出土舱，其对土压平衡盾构机土舱压力管理及地层沉降控制发挥着较大的作用。由于机械自身与土层的差异性，其配置的排土能力越大，那么土压平衡中土压管理的误差就会增大；如果太小，则满足不了排土的基本需求，造成效率低下或者地层隆起现象。排土量的计算公式如下：

$$Q = \xi \frac{\pi D^2}{4} V \times 60 = 1.3 \times \frac{\pi \times 6.44^2}{4} \times 0.08 \times 60 \approx 203.26 \text{ m}^3/\text{h} \quad (7)$$

$$Q' = (1.2 \sim 1.3) Q \approx 243.91 \sim 264.23 \text{ m}^3/\text{h} \quad (8)$$

式中， $\xi$  为土砂松散率，选为 1.3； $V$  为掘进速度，m/min。

现有盾构掘进速度设计为 80 mm/min，所需排土量为 203.26 m<sup>3</sup>/h，配置排土量约为 243.91~264.23 m<sup>3</sup>/h。鉴于本工程的软弱土体占比不大，地层自稳性较好，土压管理的精细程度要求不高，最大排土量设置为 450 m<sup>3</sup>/h，可以满足平衡土压和排土的需求。

## 5. 结语

工程中盾构机选用泥土加压的土压平衡式盾构，刀盘直径 6440 mm，刀盘开口率为 30%，采用辐板式设计，共 6 根辐条，推进油缸行程为 2100 mm，刀盘额定扭矩设计为 6846 kN·m，脱困扭矩为 8687 kN·m，最大排土量 450 m<sup>3</sup>/h。在施工过程中，改造后的盾构机掘进较为顺利，未出现刀具异常损坏、地面大范围沉降、泥饼、糊刀等问题，较好地满足了掘进深圳地区复合地层的需求。



盾构机的选型正确与否决定了盾构工程的成败，作为深圳城市轨道交通的重要工程，需要考虑到施工中地表的沉降、地下管线建筑桩基的避让、施工占地、环保情况等众多因素，这也给盾构选型造成了更多的困难。以上基于深圳地铁 12 号线土建三工区的城市隧道工程，从工程水文地质条件、盾构选型原则及方法等方面，分析计算选择了较为适宜的盾构机及参数。对盾构的选型得到了如下经验：

1) 盾构的选型必须结合水文及工程地质因素进行，不同的地层条件及占比深刻地影响着掘进施工难度，选型时应及时做好相关防护措施。

2) 土压平衡盾构可以适应由硬岩地层、软硬交互地层及砾质粘性土组成的复合地层，但需要对掘进参数的控制、滚刀的选取以及刀具的磨损问题进行重点关注。

3) 对盾构各项参数的选取均需留下足够的余量，从工程最恶劣的施工情况进行分析，可有效保证掘进的安全及工程的顺利开展。

### 参考文献

- [1] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [3] 李俊逸. 复合地层土压平衡盾构隧道掘进参数与安全控制技术[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [4] 怀平生, 安宏斌, 白晓岭, 等. 以色列富水库卡地层盾构选型研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(2): 284-290.
- [5] 尚艳亮, 鲍林, 师文君. 石家庄无水砂层盾构选型分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(11): 81-87.
- [6] 张双亚, 陈馈. 北京铁路地下直径线盾构选型[J]. 铁道工程学报, 2007(3): 70-73.
- [7] 蒋磊, 钟可, 戴勇, 等. 穿越湘江水下岩溶发育区地铁盾构选型研究与应用[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(2): 85-90+131.
- [8] 曹智, 李剑祥. 成都地铁盾构选型设计及实用性比较[J]. 隧道建设, 2014, 34(10): 1005-1010.